

應用大規模崩塌區現地監測資料建立告警機制之專家系統

陳毅輝^{[1]*} 吳冠廷^[1] 馮美禎^[2] 林建良^[2]

摘要 本研究應用大規模崩塌區的地表變位長期監測與量測到崩塌滑動時的地表變位數據，分析地表變位達警戒值且連續三小時變形速率增加之綜合評估方法 (Delta 比例法)，經由 PLAXIS 數值分析模擬以及現地監測地表變位之速率與時間分析，以新北市鶯鶯崙的崩塌破壞為案例並以桃園市光華崩塌地為驗證，得到連續三小時變形速率增加的速率比值之 Delta 比例門限值建議設定為 1.2，可設定連續三小時變形速率之 V1、V2、V3 門限值分別為 4.8、5.76、6.91 mm/hr，此機制於新北市鶯鶯崙的崩塌破壞可提早 12 小時告警，並設計成為大規模崩塌告警機制之專家系統。

關鍵詞：崩塌告警、專家系統、大規模崩塌監測。

Expert System for Providing Early Warning for Areas Prone to Large-scale Landslides

I-Hui Chen^{[1]*} Kuan-Ting Wu^[1] Mei-Chen Feng^[2] Chien-Lian Lin^[2]

ABSTRACT In this study, the correlation between slope deformation and time in a 3-h consecutive deformation curve was used as an early warning mechanism before landslide occurrence. This approach is called the delta-ratio method, wherein curves of displacement versus time are plotted, with segments of equal time set to 1 h. As the displacement of a curve increases, the segments are subtended by the larger displacement of a 1-h interval, as evident from numerical analysis with PLAXIS. This study analyzed the delta ratio of on-site monitoring data collected using surface extensometers in Taiwan's Gugulun and Guanghua landslide areas, where landslides occurred in 2021 and 2022, respectively. The expert system using the delta-ratio method revealed a displacement velocity ratio of 1.2. V0 was 4 mm/h, and V1, V2, and V3 were 4.8, 5.76, and 6.91 mm/h, respectively. Overall, the expert system provided a landslide warning 12 h in advance when velocity thresholds were set at V1, V2, and V3.

Key Words: Landslide warning, Expert system, Large-scale landslide monitoring

一、前言

邊坡破壞的預警與現地監測之告警機制是目前與過去學者研究的重要方向，預警機制之建立可減輕土石崩塌對人類生命和經濟損失的影響，故在預測邊坡破壞時間或變位，在水土保持與大地工程具重大意義，其理論基礎主要建立在地質材料的潛變特性，在預測崩塌破壞或地滑的國外研究，以齊藤迪孝 (1968) 最早提出邊坡破壞的變形是一種隨時間發生的地形潛變，主要發生在地質材料的塑性應力條件，潛變可以分為三個階段，如圖 1(a) 所示，第一階段為地形潛變初始階段，地表變位之應變開始為等速變形，隨著時間與地表變位越來越大，但在第一階段後期有應變減速之現象，後續進入第二階段為地表變位持續變大且呈等速之應變趨勢，最後進入第三階段，為地表變位持續加速，應變與時間呈現變形加速現象直到邊坡發生破壞或崩塌，儘管有些學者將塑

性變形的第二階段解釋為第一階段和第三階段的線性疊加或兩者之間的過渡 (福囿輝旗, 1985; Intrieri et al., 2012; Segalini et al., 2018)。齊藤迪孝 (1987) 基於從第二階段潛變曲線或第三階段潛變曲線獲得實際現場監測數據，提出一經驗公式用於描述應變速率 ϵ (10^{-4} 分鐘表示) 和剩餘時間 t_r (以分鐘表示) 之間的預測邊坡破壞時間關係，如圖 1(b) 所示。

然而，在過往進行預測破壞時間點，常常會過度預測破壞時間點 (福囿輝旗, 1985; Segalini et al., 2018)。而 Intrieri et al. (2019) 利用第三階段之實際邊坡破壞的一段時間內，預測在此時間的地表變位量，利用整個第三階段的變位量平均值 (消除異常值及不合理值)，當變形速率越來越大時，即有可能發生崩塌，且預測達到破壞的時間會越來越短，如圖 2 所示，此結果可能較僅使用預測時間的成果更好。圖 2(a) 之 (2a) 說明速率 (V) 漸增，變位呈現加速度之情形，直至在時間 t_r 時，邊坡理論上達破壞，在理論上之變位速率將達

[1] 國立中興大學土木工程學系

Department of Civil and Engineering, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 農業部農村發展及水土保持署

Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, Nantou County, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: cih82ian@nchu.edu.tw

無限大。圖 2(a) 之(2b) 說明經歷初始加速後，速度漸減，使邊坡滑動達另一種平衡狀態，而不使邊坡完全破壞，可能僅為局部滑動或崩落。圖 2(b) 說明邊坡變位依第三階段潛變超過極限平衡之 t_0 時間，則變形速率加速，若 t_0 界定為地表變位監測儀器達警戒值門檻之時間點，且變形速率達到下一時間點 (Δt_0) 有 ΔD 的變位量，再下一時間點 (Δt_1) 有 ΔD 的變位量，再下一時間點 (Δt_2) 有 ΔD 的變位量，則變形加速確立，預測達到時間點 t_r 將造成崩塌災害 (Intrieri et al., 2012; 2019; 2021)。

本研究根據圖 2(b) 崩塌破壞前最後階段的位移曲線，結合目前國內農村水保署之大規模崩塌監測整合系統之監測儀器的即時監測資料進行分析，提出適合大規模崩塌監測整合系統可以即時告警邊坡存在崩塌高風險的自動化研判分析方法，將崩塌破壞的第三階潛變曲線應用現地監測資料擬和與數值模式分析後，建立成為連續三小時變形速率持續增加之變位量與時間關係圖，如圖 3 所示，若崩塌潛勢區之現地地表變位監測值達到警戒值 (圖 3 之 t_0 時間點)，且變形速率達到下一時間點 ($\Delta t=1$ 小時) 有 $\Delta D1$ 的變位量，再下一小時有 $\Delta D2$ 的變位量，再下一小時有 $\Delta D3$ 的變位量，則變形加速確立，預測達到時間點 t_r 將造成崩塌災害，並以實際崩塌案例與監測數據說明此連續三小時變形加速理論 (簡稱 δ 比例法)，並建立大規模崩塌監測整合系統自動化研判之專家系統流程。

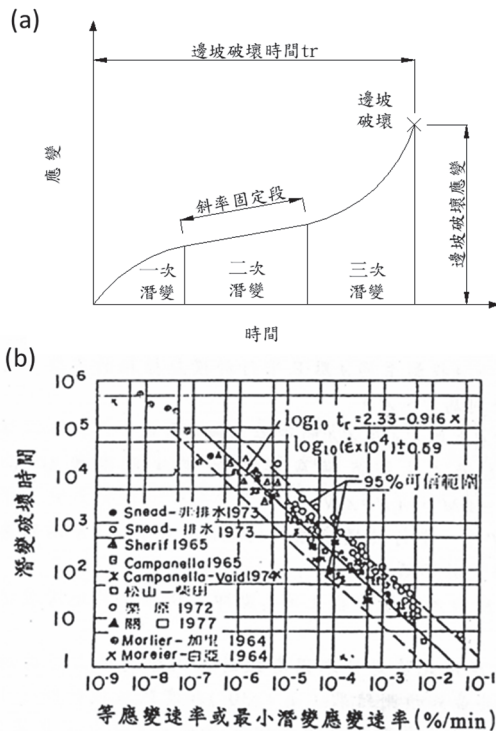


圖 1 潛變破壞時間之關係圖 (齊藤迪孝, 1968、1987)

Fig.1 Relations of creep failure and time

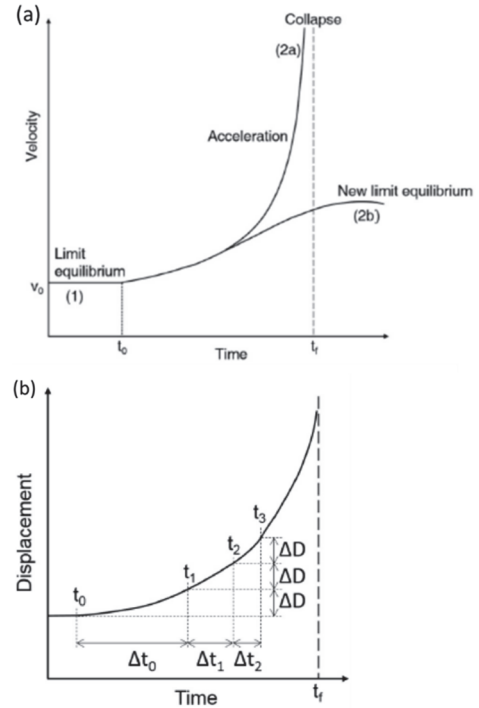


圖 2 潛變破壞速率與變位量之關係圖 (Intrieri 等人, 2019)

Fig.2 Relations of creep failure velocity and displacement

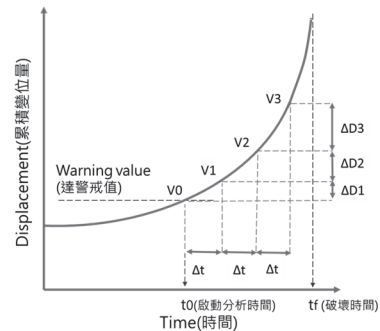


圖 3 連續三小時變形加速曲線圖

Fig.3 Deformation acceleration curve in consecutive three hours

二、研究方法

本研究針對新北市汐止區鵠鵠崙崩塌區地表伸縮計之變位量監測資料進行分析，此崩塌區受到 2022 年尼莎颱風 (10 月 15 日至 18 日) 之豪大雨影響，於 18 日發生局部崩塌，下邊坡崩塌面積約 3.3 公頃，估計土石約 6.8 萬立方公尺，土砂堆積至下邊坡之保長坑溪支溪野溪 (土石流潛勢溪流編號：新北 DF197)，造成上邊坡道路中斷與農舍受損，崩塌現地空拍圖與儀器配置情形如圖 4，因該區於 2021 年有設置雨量與地表伸縮計等自動化監測系統，故於 10 月 18 日之局部崩塌有完整的監測數據收集。其中，本工址在 2022 年 10 月 18 日崩塌前，只有地表伸縮計 E，在崩塌後才安裝另一組地表伸縮計 E2，因此本研究僅針對地表伸縮計 E 的監

測資料加以分析。本研究將地表伸縮計 E(位於崩塌區上邊坡處)之監測數據分析實際崩塌時間與地表變位量比對, 建立連續三小時變形速率持續增加之速率比值[以下簡稱 Delta (δ) 比例]的統計分析, 另現地編號 E2 之地表伸縮計為發生 10 月崩塌事件後才新增的儀器, 新增時間為 2022 年 10 月 20 日, 故本研究僅針對編號 E 地表伸縮計進行 δ 比例之分析, 並以數值分析軟體 (PLAXIS) 分析邊坡破壞時之臨界條件與變形量之模擬以求得邊坡破壞時之變形速率增加的 δ 比例範圍, 然後比較現地監測數據之擬合計算, 求得邊坡變形速率增加的 δ 比例門檻值, 建立輔助自動化研判崩塌高風險的告警機制專家系統。



圖 4 鵠鵠崙現地空拍及儀器配置圖

Fig.4 On-site aerial photograph and location of instruments in Gugulun landslide area

本研究針對 2022 年 10 月 17 日至 18 日鵠鵠崙崩塌事件之地表伸縮計監測資料作為 δ 比例法分析說明, 其監測時序圖如圖 5 所示, 監測系統於 10 月 17 日 00:30 達到系統預設之警戒值 (50 mm/day), 如同圖 2 (Intrieri et al., 2019) 定義之時間 (t_0) 與變形速率 (V_0) 之邊坡破壞第三階段潛變起始點。此崩塌事件於 10 月 17 日 00:30 後變位速率持續增加, 於 10 月 18 日 02:00 達到變位速率最大值, 並於 10 月 18 日 11:00 發生下邊坡局部崩塌破壞情形。

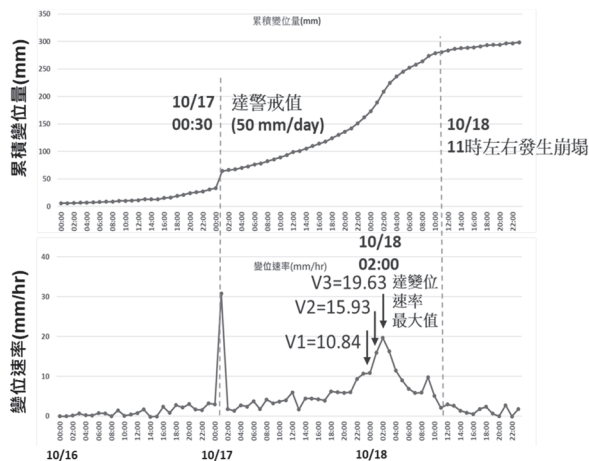


圖 5 鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區之地表伸縮計監測時序圖

Fig.5 Extensometer monitoring graphs in Gugulun large-scale landslide

由圖 5 的累積變位量監測圖形, 其變位曲線近似於 Intrieri et al. (2019) 提出之潛變破壞時間關係圖[圖 2(b)], 本研究根據圖 2(b) 崩塌破壞前最後階段的位移曲線, 改以連續三小時變形加速曲線圖 (圖 3), 並擬合圖 5 的實際累積變位量監測圖形, 發現兩曲線 (理論圖形與實際監測圖形) 都接近邊坡破壞變形第三階段潛變之初始線型 (圖 6)。由圖 6 可以看出鵠鵠崙崩塌區於 10 月 17 日至 18 日之地表伸縮計累積變位量圖形符合連續三小時變形加速曲線圖, 但最後之破壞曲線並無往上無限延伸, 可能是因為此儀器位於破壞邊坡之上緣並無整個隨崩塌而儀器損壞。然而此邊坡確實已發生崩塌破壞並於上邊坡量測到變形加速現象, 故可作為分析連續三小時變位速率增加的 δ 比例法之分析案例。

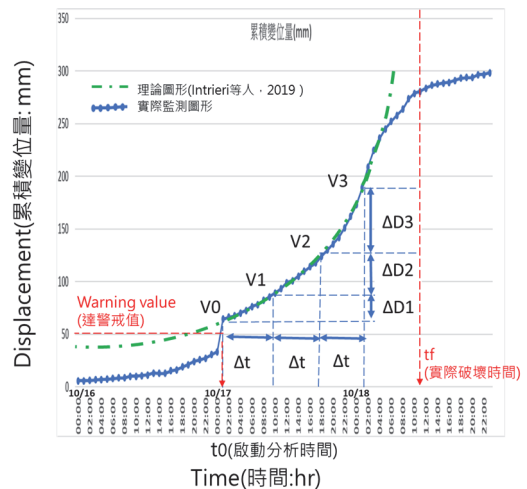


圖 6 地表伸縮計實際監測圖與破壞曲線理論圖形比對

Fig.6 Comparison with actual monitoring and theoretical failure curve for extensometer

1. PLAXIS 數值分析

本研究利用 PLAXIS 2D 軟體進行分析, PLAXIS 是一個大地工程有限元素法 (FEM) 分析軟體, 用於模擬土壤和岩石行為, 以評估邊坡穩定性、變形和地下水流等因素。透過模擬能預測邊坡受載時行為, 可模擬邊坡破壞之安全係數以及邊坡崩塌過程之小變形量推估。

本研究區域為鵠鵠崙崩塌區進行模擬試驗, 以該崩塌區之 BB' 剖面進行分析, 進行模型建立、土壤參數設定、邊界條件調整及分析方式設定 (塑性及安全性分析), 且設定相對應之參數, 圖 7 及圖 8 為本研究之剖面位置及剖面圖, 表 1 為本次數值分析所使用參數, 主要參考歷年鵠鵠崙地區潛在大規模崩塌調查監測報告 (農村水保署, 2022; 2023) 進行邊界設定與數值模擬。上述報告之歷年地下水監測, 上邊坡常時水位約在地下 40 公尺, 最高水位為尼莎颱風 2022 年 10 月 16 日約地表下 14 公尺; 下邊坡常時水位約在地下 15 公尺, 最高水位約 9 公尺, 變動量約 6 公尺。因此, 本研究之 PLAXIS 的地下水設定用內插方式, 上邊坡從地下 40 m 處的常時水位開始上升, 下邊坡約從地下 15 公尺開始上升, 以 24 小時時間區隔做設定, 主要分析 24 小時內之邊坡穩定性與變位情形, 藉以分析是否可提早告警邊坡破壞之模擬,

在模擬過程中，每 0.5 小時計算一次累積變位量，故可得到 48 筆水位上升過程中邊坡的變形量，這些累積變位數據有助於了解邊坡在不同水位條件下的變形模式和變形速率，從而評估邊坡的穩定性。但當模擬地下水上升至 14 公尺時，於上升至深擊地下約 24 公尺時，其安全係數 (FS) 小於 1。安全係數小於 1 表示邊坡已達到或超過其承載能力，有出現崩塌的風險。因此，通過這種逐步上升水位的數值模擬方法，可有效地分析不同水位條件下邊坡的變形和破壞行為，為邊坡穩定性評估提供可靠的數據支持。為求得更多筆水位上升過程中邊坡的變形量，因此本數值模式，在增加地下位從 40 公尺上升至地下 16、18、20、22、24 公尺位置的邊坡破壞與變位分析，相同設定以 24 小時時間區隔做設定，當安全係數小於 1 時則停止分析，主要分析 24 小時內之模型變位情形，每種地下水位上升條件，透過每 0.5 小時計算一次累積變位量，這些累積變位數據有助於了解邊坡在不同水位條件下的變形模式和變形速率，並套用前述之 δ 比例法分析，從而評估邊坡可能破壞之提早告警機制。

分析內容則為從常時地下水位 (上邊坡約地下 40 m 處) 以內插方式將地下水上升至設定水位，透過每 0.5 小時計算一次累積變位，直至 24 小時或崩塌區發生崩塌 (安全係數小於 1)，來進行分析並擬圖 6 之破壞曲線理論圖形的 V0、V1、V2、V3 速率數值分析值以及計算建議採用 δ 比例法之 δ 值，即 $\delta = V3/V2 = V2/V1 = V1/V0$ ，V0 為 t_0 時間點達警戒值門檻時的每小時變位速率 (mm/hr)，V1、V2、V3 為邊坡破壞前之每小時持續速率增加值，即變形呈現加速度之現象， δ 比例值若以實際監測數據應該是變動的，但為求自動化專家系統的設定，本研究將建議一個固定比例值，故可在監測專家系統簡化為設定每個崩塌潛勢區之 V0 與 δ 比例值，系統即可自動研判現地地表變位監測值是否達 $V3 > V2 > V1$ 的

可能崩塌破壞模式。

表 1 數值分析模型土岩參數

Table 1 Material properties used for numerical analysis

	單位	岩屑層	岩層 (砂岩偶夾頁岩)
乾單位重, γ	kN/m^3	18	22
單位重, γ_{sat}	kN/m^3	20.3	23.5
有效楊氏模數, E'	kPa	60000	100000
有效柏松比, ν'	—	0.3	0.3
有效凝聚力, c'	kPa	18.8	10800
有效摩擦角, ϕ'	degree	25	32.69
滲透係數, k_s	m/hr	0.0231	0.0106
土壤分類	—	Medium	Medium Fine

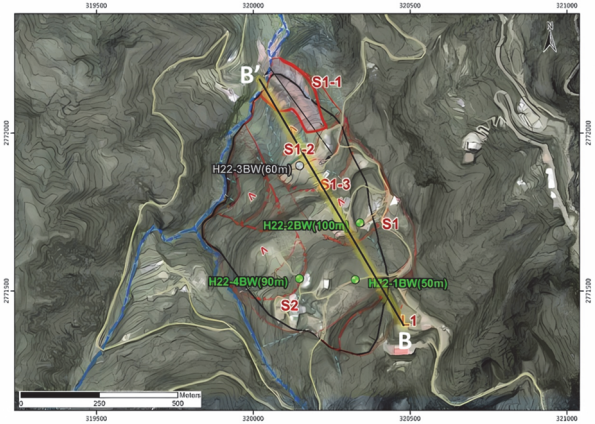


圖 7 鵠鵠崙剖面位置圖 (BB'測線；農村水保署，2022)

Fig.7 Profile location in Gugulun landslide area (Line BB')

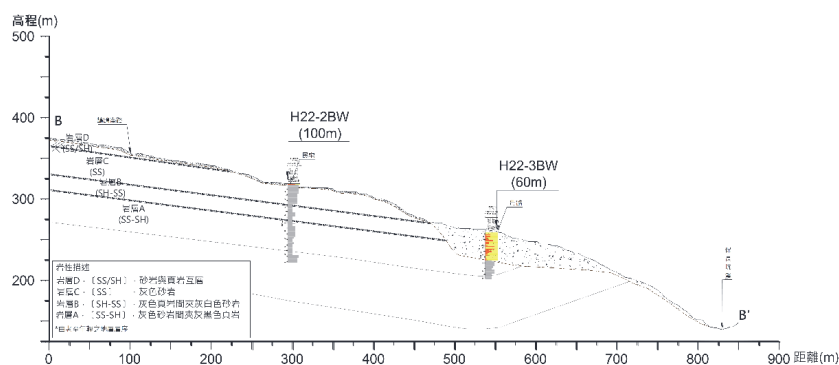


圖 8 鵠鵠崙地質剖面圖 (農村水保署，2022)

Fig.8 Geological profile in Gugulun landslide area

FEM 分析模擬包括地下水位上升設定至地表下 24、22、20、18、16、14 m 位置的邊坡破壞與變位分析，透過每 0.5 小時計算一次累積變位，直至 24 小時或崩塌區發生崩塌 (安全係數小於 1)，主要為求獲得更多的 δ 比例計算之數值。FEM 分析顯示，雖然地下水位上升設定在地表下不同處，但發生破壞時 ($FS < 1$) 之地下水位皆約落在地下 24 m 處，圖 9 為數值分析過程之地下水位上升從常時水位 (-40 m) 至

-14 m 的案例說明，為數值分析常時地下水位起始條件之圖示以及分析邊坡破壞 (安全係數小於 1) 之圖示。表 2 為地下水位從常時水位 (-40 m) 至 -14 m 案例分析統計之變形速率計算方式與 δ 比例值的計算過程。表 2 為利用試算表之計算分析，首間計算累積變位量的塑性變形時段之速率 (mm/hr)，接著將其速率進行比值 (V_{i+1}/V_i) 比例，即下一小時速率除以上一小時速率；然後進行觸發 δ 比例值之計算，

即達到連續三小時速率增加 ($V1 < V2 < V3$) 的條件下的 δ 值 (V_{i+1}/V_i)，依據發生連續變位速率增加情形進行計算 (如表 2 之灰底部分)，將連續變位速率增加之 V_{i+1}/V_i 的變位速率比值 (Δ) 平均值，得到觸發 δ 值計算之 V_{i+1}/V_i 比例平均值為 1.53。另，從啟動到邊坡破壞之 V_{i+1}/V_i 比例平均值為 1.37。表 3 為整理數值分析的上邊坡地下水變動設定值從地下-40 m 至地表下分別為-24、-22、-20、-18、-16、-14 m 位置的邊坡破壞與變位分析所計算整理之 (V_{i+1}/V_i) 平均值 δ

比例值，其中模擬不同地下水位模擬不同地下水上升速度，以獲取更多組變位速率，以分析 δ 比例法之 δ 值分布，從表 3 可以看出，雖然模擬不同地下水位模擬不同地下水上升條件，但當數值模擬邊坡破壞時 ($FS < 1$)，地下水位都約在-24 m，另表中的觸發 δ 值計算和或啟動到邊坡破壞之 (V_{i+1}/V_i) 平均值約在 1.1~1.5 之間，以此範圍進行實際監測數據之案例分析，可將其數據套用至現地監測數據，進行後續分析及建議理想之 δ 比例值的預警門檻值。

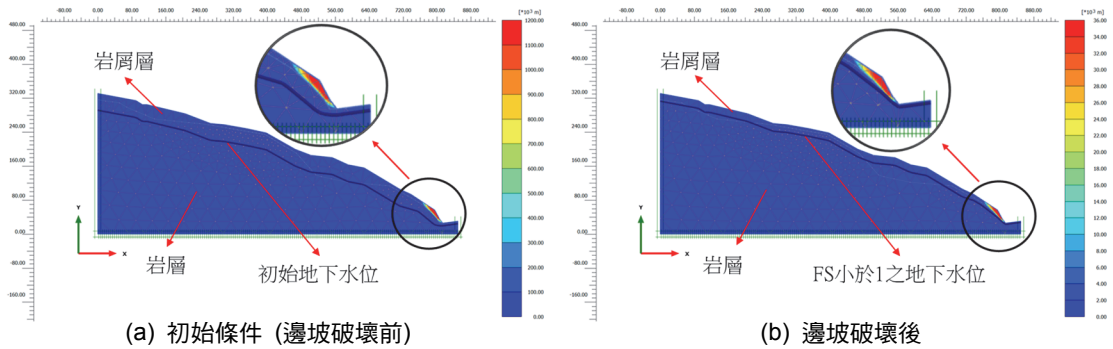


圖 9 設定地下水位上升從-40 m 至-14 m 之每 0.5 小時計算邊坡安全性分析

Fig.9 Slope safety analysis from -40 m to -14 m below ground with water level rise in an interval of 0.5 hour (a) before slope failure; (b) after slope failure

表 2 PLAXIS 分析—設定地下水位上升從-40 m 至-14 m 之 δ 值分析表

Table 2 δ values of PLAXIS analysis from -40 m to -14 m below ground with water level rise

時間 (hr)	累積變位量 (mm)	速率 (mm/hr)	V_{i+1}/V_i 比例	觸發 δ 值計算	說明
0	0	-	-	-	-
0.5	51.61	-	-	-	-
1	58.37	13.52	-	-	-
1.5	65.13	13.52	1	Y	連續三小時速度增加，觸發 δ 值 (灰色部分) 計算之平均 (V_{i+1}/V_i 比例)=1.53 啟動分析到邊坡破壞 (時間1.5hr至13.5hr) 平均 (V_{i+1}/V_i 比例)=1.37
2	72.62	14.98	1.11	Y	
2.5	89.04	32.84	2.19	Y	
3	110.3	42.52	1.29	Y	
3.5	131.4	42.2	0.99	Y	
4	155.2	47.6	1.13	Y	
4.5	180.8	51.2	1.08	Y	
5	208.3	55	1.07	Y	
5.5	235.4	54.2	0.99	N	
6	262.29	53.78	0.99	Y	
6.5	291.5	58.42	1.09	Y	
7	323.8	64.6	1.11	Y	
7.5	348.6	49.6	0.77	N	
8	381.5	65.8	1.33	N	
8.5	408.2	53.4	0.81	N	
9	439.6	62.8	1.18	N	
9.5	464.6	50	0.80	N	
10	499.2	69.2	1.38	N	
10.5	531.8	65.2	0.94	N	
11	554.9	46.2	0.71	Y	
11.5	582.9	56	1.21	Y	
12	615.9	66	1.18	Y	

時間 (hr)	累積變位量 (mm)	速率 (mm/hr)	Vi+1/Vi比例	觸發 δ 值計算	說明
12.5	624.1	16.4	0.25	Y	
13	635.5	22.8	1.39	Y	
13.5	729	187	8.20	Y	
14	737.9	17.8	-	-	邊坡破壞 (FS<1) 時，地下水位為 -23.65 m，停止分析。

表 3 數值模擬地下水位變動對應 δ 值Table 3 Corresponding δ values for groundwater level fluctuations using numerical model

上邊坡地下水變動設定值	模擬不同地下水上升速度	(FS<1) 時，地下水位	觸發 δ 值計算之 (Vi+1/Vi) 平均值	啟動到邊坡破壞之 (Vi+1/Vi) 平均值
-40 ~ -14 m	1.10 m/hr	-23.65 m	1.53	1.37
-40 ~ -16 m	1.01 m/hr	-24.1 m	1.54	1.41
-40 ~ -18 m	0.93 m/hr	-24.04 m	1.13	1.25
-40 ~ -20 m	0.85 m/hr	-24.23 m	1.44	1.28
-40 ~ -22 m	0.76 m/hr	-24.29 m	1.09	1.20
-40 ~ -24 m	0.68 m/hr	-24.00 m	1.41	1.15
			最大值 1.54	最大值 1.41
			最小值 1.09	最小值 1.15

2. 地表伸縮計監測數據分析

由上圖圖 5 鵠鵠崙之地表伸縮計 (E)10 月 17 日至 18 日的累積變位量監測圖形，當警戒值 (50 mm/day) 後，一開始為等速變位，當 10 月 17 日 18:00 後開始有變形加速之趨勢， δ 比例法是一種用於評估邊坡變形加速的計算方法，表示每小時的變位速率並計算比值，來確定邊坡是否進入變形加速階段，使用 V_0 、 V_1 、 V_2 、 V_3 四個速率參數，表 4 依據發生連續變位速率增加情形進行試算表計算，主要設定 V_0 初始速率以及計算 V_{i+1}/V_i 比例、計算 $V_1 > V_0$ 、 $V_2 > V_1$ 、 $V_3 > V_2$ 的 δ 值 (V_{i+1}/V_i 比例)，最後的 δ 值門檻值計算為設定 $V_0 > 4$ mm/hr 且 $V_3 > V_2 > V_1 > V_0$ 的 δ 值比例值。

試算表之 δ 值分析步驟如下：1. 設定初始速率及警戒值：由表 4 之變位速率於速率開始持續增加時，變位速率約大於 4 mm/hr，此於日本文獻之地表伸縮計警戒建議值相符 (表 5)，另原系統設定地表伸縮計的每日警戒值為 50 mm/day。2. 計算速率比值：依序計算每小時變位速率及其比值 ($V_3 > V_2 > V_1$)，其中之第三小時計算 δ 值 (符合 $V_3 > V_2 > V_1$ 條件：當日累積變位量 > 50 mm、 $V_0 > 4$ mm/hr 且

三個連續時段速率遞增；試算： δ 值 (V_{i+1}/V_i 比例)，其 δ 值分別得到 V_1/V_0 、 V_2/V_1 、 V_3/V_2 。

後續經由上述計算方法，分析此次崩塌過程之數值，依據發生連續變位速率增加情形進行計算 (如表 4 之灰底部分符合設定條件 $V_0 > 4$ mm/hr 且 $V_3 > V_2 > V_1 > V_0$ 的 δ 值比例值)，將表 4 灰底部分 (紅框) 之 V_{i+1}/V_i 變位速率比值 (δ) 平均值，得到約為 1.30 (觸發 δ 值計算之平均值)。另定義從儀器達警戒值開始 (2022/10/17 的 1:00) 且 V_0 大於 4 mm/hr 至發生崩塌 (2022/10/18 的 11:00) 之 δ 值 (門檻值計算) 的平均值為 1.24 (啟動到崩塌 δ 值平均)，故保守定義可能發生崩塌之高風險的 δ 值門檻值訂定為 1.2。

例如圖 5 之地表伸縮計 (E) 於 10 月 18 日 02:00 達變位速率最大值 19.63 mm/hr (若定義為 V_3)，則往前一小時的變位速率 (V_2) 與 V_1 分別為 15.93、10.84 mm/hr，則是試算 δ 比例值，分別為 2.71、1.47、1.23，其 δ 比例值皆大於 1.2 門檻值 (崩塌風險為高)，時間距離本事件真正崩塌時間點約 18 日 11:00 點，提早告警約 9 小時。

表 4 鵠鵠崙之地表伸縮計 (E)10 月 17 日 δ 值分析表Table 4 δ value analysis of extensometer in Gugulun landslide area in October 17th

日期	時間	日變位量 (mm/day)	速率 (mm/hr)	Vi+1/Vi 比例	δ 值符合 $V_1 > V_0$ (4mm/hr) δ 值 = $V_1 / 4$	δ 值 (符合 $V_2 > V_1$)	δ 值 (符合 $V_3 > V_2 > V_1$)	δ 值 (門檻值計算)
2022/10/17	01:00	58.33	-	-	-	-	-	-
2022/10/17	02:00	60	1.82	0.06	-	-	-	0.06
2022/10/17	03:00	60.7	1.34	0.74	-	-	-	0.74
2022/10/17	04:00	63.21	2.75	2.05	-	-	-	2.05
2022/10/17	05:00	65.4	2.41	0.88	-	-	-	0.88
2022/10/17	06:00	68.4	3.74	1.55	-	-	-	1.55
2022/10/17	07:00	69.45	1.75	0.47	-	-	-	0.47

日期	時間	日變位量 (mm/day)	速率 (mm/hr)	Vi+1/Vi 比例	δ值符合 V1>V0(4mm/hr) δ值=V1 / 4	δ值 (符合V2>V1)	δ值 (符合V3>V2>V1)	δ值 (門檻值計算)
2022/10/17	08:00	73.64	4.19	2.39	1.05	-	-	2.39
2022/10/17	09:00	75.45	3.27	0.78	-	-	-	0.78
2022/10/17	10:00	79.04	3.69	1.13	-	-	-	1.13
2022/10/17	11:00	82.62	4.02	1.09	1.01	1.01	-	1.09
2022/10/17	12:00	87.79	5.01	1.25	1.25	-	-	1.25
2022/10/17	13:00	87.8	1.68	0.28	-	-	-	0.28
2022/10/17	14:00	92.36	4.43	2.64	1.11	-	-	2.64
2022/10/17	15:00	96.85	4.43	1.00	1.11	-	-	1.00
2022/10/17	16:00	98.76	4.27	0.96	1.07	-	-	0.96
2022/10/17	17:00	101.81	3.91	0.92	-	-	-	0.92
2022/10/17	18:00	105.21	3.4	1.59	-	-	-	1.59
2022/10/17	19:00	109.03	3.82	0.97	-	-	-	0.97
2022/10/17	20:00	111.88	5.87	0.98	1.47	1.47	1.47	1.47
2022/10/17	21:00	116.21	6.01	1.02	1.50	1.02	1.02	1.02
2022/10/17	22:00	124.02	9.35	1.55	2.34	1.55	1.55	1.55
2022/10/17	23:00	131.47	10.67	1.14	2.67	1.14	1.14	1.14
2022/10/18	00:00	139.32	10.84	1.02	2.71	1.02	1.02	1.02
2022/10/18	01:00	124.5	15.94	1.47	3.99	1.47	1.47	1.47
2022/10/18	02:00	142.32	19.64	1.23	4.91	1.23	1.23	1.23
2022/10/18	03:00	157.28	16.3	0.83	4.08	0.83		0.83
2022/10/18	04:00	165.99	11.46	0.70	2.87	0.70		0.70
2022/10/18	05:00	172.56	8.99	0.78	2.25	0.78		0.78
2022/10/18	06:00	175.7	6.88	0.77	1.72	0.77		0.77
2022/10/18	07:00	179.81	5.86	0.85	1.47	1.47	1.47	1.47
2022/10/18	08:00	181.53	5.91	1.01	1.48	1.01	1.01	1.01
2022/10/18	09:00	188.02	9.76	1.65	2.44	1.65	1.65	1.65
2022/10/18	10:00	189.42	5.08	0.52	1.27	0.52		0.52
2022/10/18	11:00	187.55	2.13	0.42	-	-		0.42
崩塌破壞								
觸發δ值計算之平均值：1.30								
啟動到崩塌δ值之平均值：1.24								

表 5 日本地表伸縮計警戒建議值 (全国地すべりがけ崩れ対策協議会，2000)

Table 5 Warming values of extensometer in Japan

管理階段	注意	警戒	疏散
基準値	V≥1 mm/day	V≥10 mm/day	連續2小時V≥2 mm/hr 或 V≥4 mm/hr
地表徵兆	裂隙、地表凹凸、門窗變形等		小山崩、湧泉等

三、研究結果與討論

依據上述數值分析結果與鵠鵠崙地表伸縮計實際監測數值計算方法，對於連續三小時變形速率增加之 V1、V2、V3 變位速率的設定分析 δ 比例法，討論說明如下：

由圖 10 鵠鵠崙之地表伸縮計 (E) 10 月 17 日監測比對圖分析，當達系統預設之警戒值 (50 mm/day) 後，一開始並無變形加速之現象，僅為等速變位，當 10 月 17 日 18:00 後開始有變形加速之趨勢，如上述表 4，其變位速率約大於 4 mm/hr，此於日本文獻之地表伸縮計警戒建議值相符 (表

5)，故本研究統計大於 4 mm/hr 的變位速率 (10 月 17 日 18:00 至 10 月 18 日 10:00) 中，選取連續三小時變位速率持續增加之變位速率比值 (δ) 平均值，得到約為 1.2 (表 4)，所以套用 V0=4 mm/hr，δ=1.2，得到 V1=4.8 mm/hr、V2= 5.76 mm/hr、V3= 6.91 mm/hr，最後利用此 V1、V2、V3 門檻值進行試算表之計算地表伸縮計 (E) 於 10 月 18 日崩塌事件 (圖 10) 與 12 月 11 日豪雨事件 (圖 11) 的實際監測數據，皆得到每日達 50 mm/day 警戒值且 V3>V2>V1 大於門檻值，其變形加速確立、崩塌風險為高的告警機制，故本研究應用

連續三小時變位速率持續增加之理論應屬合理。

另由數值分析結果，此邊坡模擬破壞分析結果的 δ 比例法，約在 1.1 與 1.5 之間（表 3），若以數值模擬之邊坡變形加速的起始速率平均為 10 mm/hr，則 V1 則在 11~15(mm/hr)、V2 則在 12.1~22.5(mm/hr)、V3 則在 13.31~33.75(mm/hr)，此數據對照鵠崙崙實際監測儀器之監測值，則僅於 10 月 18 日 0 時、1 時、2 時接近此設定，所以此 δ 比例法對於 V0 的起始速率設定值為關鍵設定值，若以實際監測數據以及實際邊坡崩塌之考量下，地表伸縮計監測建議 V0 設定為 4 mm/hr，此與過去日本文獻（表 5）之設定疏散基準值相同且與表 4 之現地監測數據統計結果一致。

本研究另以桃園市光華崩塌區之地表伸縮計 110 年 2 月之監測資料作為驗證的案例，光華崩塌區位於桃園市復興區華陵里，自 110 年 1 月 27 日起，邊坡明顯位移，且有加速趨勢，崩塌滑動範圍約 3.4 公頃，雖然此區並無造成大規模崩塌，但已造成位於崩塌地頭部之光華農路中斷，並影響崩塌地下方光華道路交通安全。光華崩塌地初期（2 月~3

月）崩塌位移明顯，平均位移速率大於 100 mm/day。在時雨量大於 30 mm 或 24 小時累積雨量大於 160 mm 即有滑動的現象，但大部分監測數據顯示屬於等速滑動並無大規模崩塌之情事，但總變位量已達十幾公尺，仍具潛在高風險崩塌區。

本研究擷取 110 年 2 月 20 日至 28 日有明顯變形加速區間進行分析與驗證。將光華地表伸縮計 (KC1) 變位速率比值 (δ) 設定為 1.2 的驗證計算過程如下：

分析此區間之地表伸縮計累積變位量及 1 日變位量，利用其差值換算成當時段之每小時速率 (mm/hr)，接著將其速率進行比值 (V_{i+1}/V_i) 計算，分析圖形如圖 12 所示，得到地表變位有達到系統預設之警戒值 (50 mm/day) 且 $V_3 > V_2 > V_1$ 大於門檻值的變位速率比值 (即 δ 值 > 1.2)，在 110 年 2 月 21 日 10:00、110 年 2 月 26 日 6:00、110 年 2 月 27 日 12:00 三個時段，其 V0 大於 4 mm/hr 開始有變形加速現象且連續三小時變位速率持續增加，故可驗證此區確實有變形加速確立、崩塌風險為高的 δ 比例法研判成果（試算表計算結果如表 6 之紅框）。

表 6 光華崩塌地之地表伸縮計 (KC1) 監測資料分析表

Table 6 Analysis Table of extensometer in Guanghua landslide area

日期	時間	日變位量 (mm)	速率 (mm/hr)	V_{i+1}/V_i 比例	δ 值符合 $V_1 > V_0(4\text{mm/hr})$ δ 值= $V_1/4$	δ 值 符合 $V_2 > V_1$	δ 值 符合 $V_3 > V_2 > V_1$	δ 值 (門檻值計算)
2021/2/21	06:00	55	12	-	-	-	-	-
2021/2/21	07:00	84	30	2.50	7.50	-	-	0.00
2021/2/21	08:00	92	8	0.27	2.00	2.00	2.00	2.00
2021/2/21	09:00	107	15	1.88	3.75	1.88	1.88	1.88
2021/2/21	10:00	131	24	1.60	6.00	1.60	1.60	1.60
2021/2/21	11:00	150	19	0.79	4.75	4.75	-	0.79
2021/2/21	12:00	188	38	2.00	9.50	2.00	-	2.00
2021/2/21	13:00	217	29	0.76	7.25	0.76	-	0.76
.....								
2021/2/26	01:00	185	5	-	-	-	-	-
2021/2/26	02:00	189	5	1.00	-	-	-	1.00
2021/2/26	03:00	195	6	1.20	1.50	-	-	1.20
2021/2/26	04:00	199	6	1.00	1.50	1.50	1.50	1.50
2021/2/26	05:00	201	9	1.50	2.25	1.50	1.50	1.50
2021/2/26	06:00	208	13	1.44	3.25	1.44	1.44	1.44
2021/2/26	07:00	202	3	0.23	0.75	0.23	-	0.23
.....								
2021/2/27	08:00	151	7	-	-	-	-	-
2021/2/27	09:00	143	4	0.57	1.00	0.57	-	0.57
2021/2/27	10:00	114	5	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
2021/2/27	11:00	118	12	2.40	3.00	2.40	2.40	2.40
2021/2/27	12:00	143	25	2.08	6.25	2.08	2.08	2.08
2021/2/27	13:00	143	3	0.12	0.75	0.12	-	0.12
2021/2/27	14:00	155	19	6.33	4.75	6.33	-	6.33

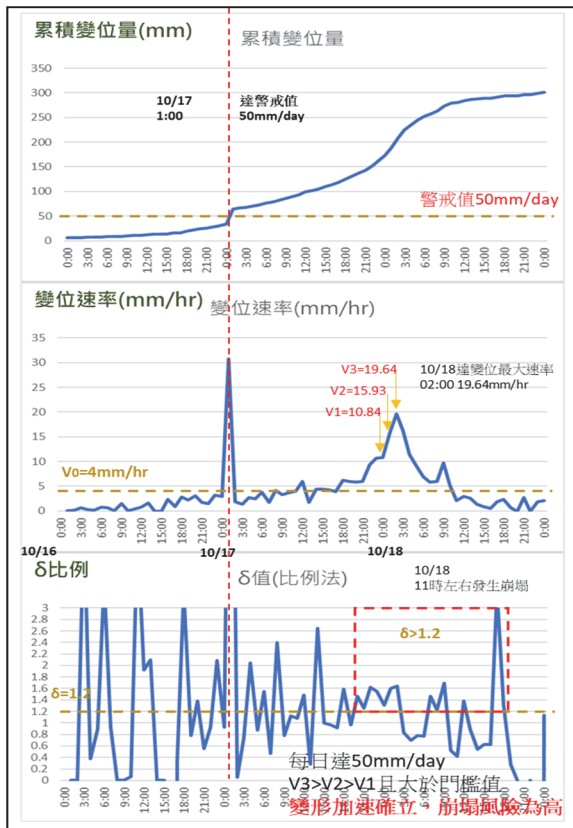


圖 10 鵠鵠崙之地表伸縮計 (E)10月17日監測比對圖 (二)

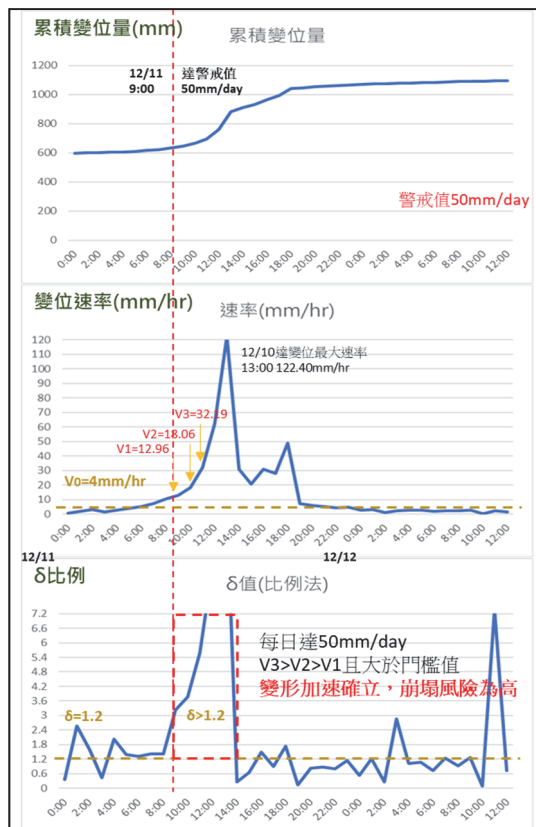
Fig.10 Extensometer monitoring graphs in Gugulun landslide area in October 17th

圖 11 鵠鵠崙之地表伸縮計 (E)12月11日監測比對圖

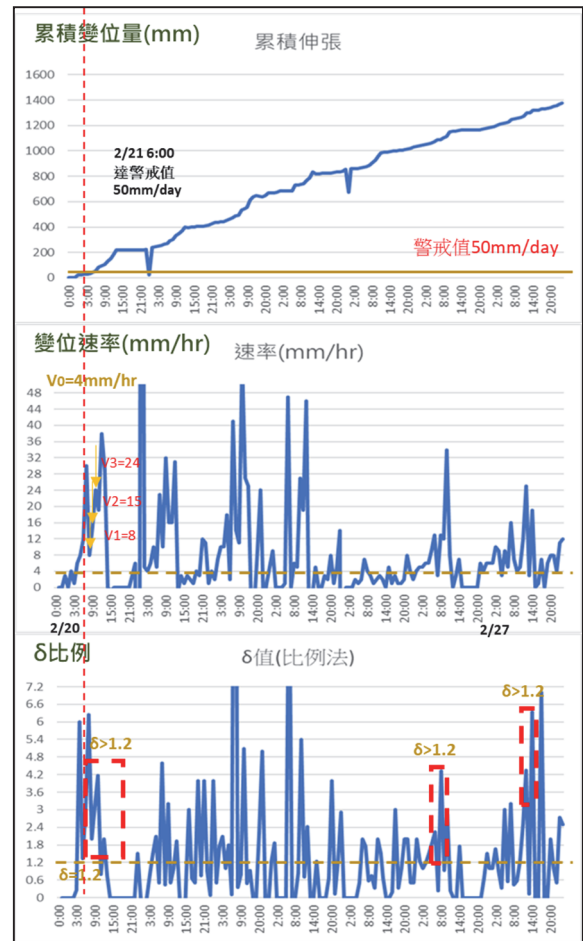
Fig.11 Extensometer monitoring graphs in Gugulun landslide area in December 11th

圖 12 光華之地表伸縮計 (KC1)2月監測比對圖

Fig.12 Extensometer monitoring graphs in Guanghua landslide area in February

最後，專家系統設計由現行之大規模崩塌監測整合系統納入三小時變形速率增加之 δ 比例法流程，如圖 13 之研判機制流程設計，本計畫應用連續三小時變形加速理論之 δ 比例法，其理論背景衍生自齊藤迪孝 (1968、1987) 學者之觀念，因此為使系統使用者或決策者更容易了解此理論背景，故於專家系統設計以達齊藤法 (3hr) 為簡稱，即為本研究之地表變形速率加速之分析方法。目前可於大規模崩塌監測整合系統設定三小時位移速率之 V_1 、 V_2 、 V_3 門檻值，如下圖 13(a)，因為本研究地表伸縮計之 δ 比例法建議為 1.2、 V_0 為 4 mm/hr，所以系統可設定 $V_1=4.8$ mm/hr、 $V_2=5.76$ mm/hr、 $V_3=6.91$ mm/hr。另，系統可自動化告警達警戒且達三小時變形速率持續增加時，專家系統將顯示於系統中之達齊藤法 (3hr) 的儀器個數，如圖 13(c) 之紅框。本研究以新北市鵠鵠崙崩塌區與桃園市光華崩塌區作為專家系統設定的案例，未來將持續進行監測數據收集，將可應用 δ 比例法之速率門檻值以擬訂各崩塌區之 V_1 、 V_2 、 V_3 的專家系統設定。目前系統可自動化研判達齊藤法 (3hr) 變形速率持續增加之儀器顯示，展示儀器達警戒值且達三小時變形加速之告警機制，最後由監測團隊進行崩塌區風險綜合評估[圖 13(d)]。本研究之專家系統研判機制流程，符合國外學者之建議方式 (齊藤迪孝, 1968；1987 以及 Intrieri, 2012; 2021)，當監測儀器達警

戒值，監測團隊先評估監測儀器警示檢查表之儀器正常或異常，並持續監測守視是否兩種儀器達警戒值，若系統警示已達三小時位移速率加速情形，應立即至系統填報崩塌區之風

險綜合評估表，並建議是否發布黃紅警戒，完成建立大規模崩塌區現地監測資料之地表變位告警的決策支援專家系統。

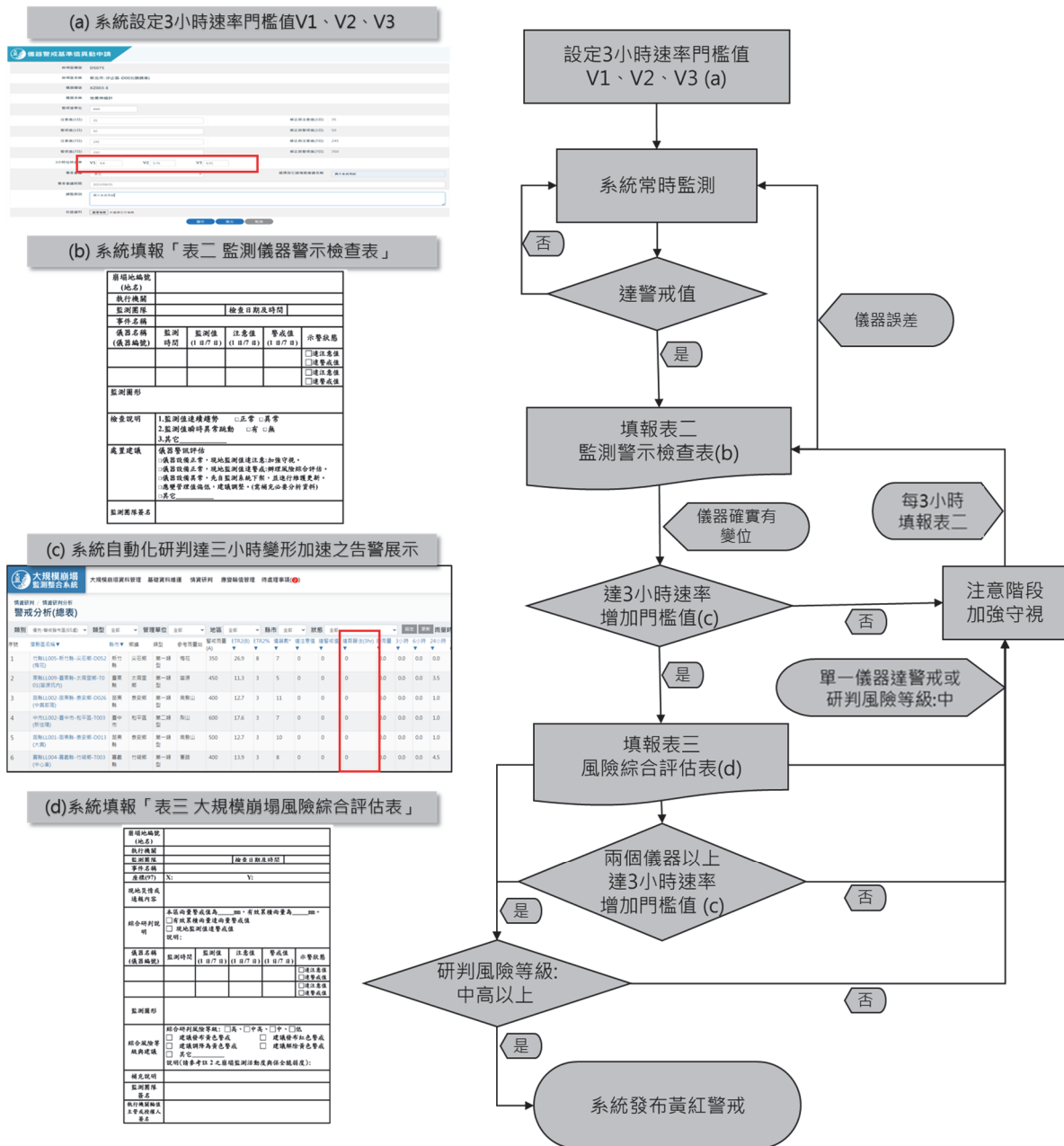


圖 13 專家系統研判機制流程與系統設定示意圖
Fig.13 Flow chart of expert system configuration

四、結論與建議

本研究應用日本齊藤法等學者之崩塌破壞的邊坡位移第三階段潛變曲線，結合目前國內農村水保署之大規模崩塌監測整合系統的即時地表變位監測資料進行分析，提出適合大規模崩塌監測即時告警邊坡具崩塌高風險的自動化研判分析方法，建立連續三小時變形速率持續增加之變位量與時間關係圖，分析前一小時與後一小時的變位速率比值，本研究稱為 δ 比例法。從數值分析模擬崩塌之變位速率並以實際

崩塌案例與監測數據說明此連續三小時變形加速理論，其研判機制為地表變形已達到儀器警戒值，系統啟動初始變形速率 (V0) 分析，並計算分析連續三小時變形速率 (V1、V2、V3)，若 V1、V2、V3 之變位速率比值 (δ 值) 皆大於門檻值，此條件下為第三階段潛變加速確立，崩塌風險為高的告警機制。

本研究分析成果之建議，變位速率比值 (δ 值) 可設定 1.1 至 1.5 之間 (數值分析模擬結果)，另由實地崩塌案例 (新北市鶯鵲峯崩塌區)，已實際崩塌前的監測數據分析，建議 δ

比例法的門檻值為 1.2，初始變形速率 (V_0) 為 4 mm/hr，故 V_1 、 V_2 、 V_3 之變位速率門檻值可設定為 $V_1=4.8$ mm/hr、 $V_2=5.76$ mm/hr、 $V_3=6.91$ mm/hr，以此 δ 比例法設定值，可告警本案例崩塌事件之提早 12 小時系統計算已達連續三小時變位速率持續增加情形。另以桃園市光華崩塌區作為本研究專家系統的驗證案例，亦符合本專家系統的告警崩塌風險高之研判成果（達儀器警戒值且連續三小時變位速率持續增加）。最後以 δ 比例法的門檻值建立系統可自動化研判達三小時變形速率持續增加之儀器顯示界面，完成大規模崩塌區現地監測資料之地表變位告警的決策支援專家系統，本專家系統將持續收集颱風豪雨期間之監測數據與分析成果，滾動式檢討本專家系統之告警設定值與自動化研判流程。

誌 謝

本研究為 112 年度大規模崩塌防災整備暨監測情資研判計畫的分析成果，感謝農業部農村發展及水土保持署提供該計畫崩落地現地資料之取得與提供告警機制大規模崩塌整合系統的平台，同時感謝幫助 112 年度大規模崩塌防災整備暨監測情資研判計畫以及大規模崩塌整合系統建置的所有長官與工作人員。

參考文獻

- [1] 農業部農村發展及水土保持署 (2022)，「111 年度鵠鵠崙地區潛在大規模崩塌調查監測計畫：成果報告書」，委託單位：青山工程顧問有限公司。(Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (2022). *Potential Large-Scale Landslide Investigation and Monitoring Plan in the GuGulun Area: Results Report in 2022*, Land and engineering consultants co., LTD. (in Chinese))
- [2] 農業部農村發展及水土保持署 (2023)，「112 年度鵠鵠崙地區及其現生崩塌地潛在大規模崩塌調查監測計畫：成果報告書」，委託單位：青山工程顧問有限公司。(Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (2023). *Potential Large-Scale Landslide Investigation and Monitoring Plan in the GuGulun Area: Results Report in 2023*, Land and engineering consultants co., LTD, Taiwan. (in Chinese))
- [3] 全國治水砂防協會 (1990)，地すべり対策事業の手引き，全國治水砂防協會。(National Flood Control and Erosion Control Association (1990). *Guide to Landslide Prevention Projects*, National Flood Control and Erosion Control Association. (in Japanese))
- [4] 杉井良平、西井稜子、石井靖雄 (2017)，地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価（地滑應變與應變速度之歷時變化引致崩塌之迫切性評估），日本地滑學會誌，54(6)，259-268。(Sugil, R., Nishii, R. and Ishii, Y. (2017). "Evaluation of urgency for failures based on temporal variation in strain and strain rate of landslide." *Landslides-Journal of the Japan Landslide Society*, 54(6), 259-268. (in Japanese))
- [5] 福田輝旗 (1985)，表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法（利用表面移動速度倒數的降雨坡面崩壊時刻預測法），地滑，22(2)，8-13。(Fuxuzono, T. (1985). "A Method to Predict the Time of Slope Failure Caused by Rainfall Using the Inverse Number of Velocity of Surface Displacement." *Landslides-Journal of Japan Landslide Society*, 22(2), 8-13. (in Japanese))
- [6] 齊藤迪孝 (1968)，第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知（三期潛變引致坡面崩壊時期之預測），地滑，4(3)，1-8。(Saito, M. (1968). "Prediction of the time of slope collapse due to tertiary creep." *Landslides-Journal of the Japan Landslide Society*, 4(3), 1-8. (in Japanese))
- [7] 齊藤迪孝 (1980)，「斜面崩壊予測」，土と基礎，29(5)，72-81。(Saito, M. (1980). "Slope Collapse Prediction." *Soil and Foundations*, 29(5), 72-81. (in Japanese))
- [8] 齊藤迪孝 (1987)，斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について（坡面崩壊時刻預測時的潛變曲線應用），地滑，24(1)，30-38。(Saito, M. (1987). "On Application of Creep Curves to Forecast the Time of Slope Failure (In Answer to Comments upon Failure Forecasting)." *Landslides-Journal of the Japan Landslide Society*, 24(1), 30-38. (in Japanese))
- [9] 齊藤迪孝 (1992)，実証土質工学（實證土壤工學），技報堂出版，144-182。(Saito, M. (1992). *Empirical Soil Engineering*, Gihodo Publishing, 114-182. (in Japanese))
- [10] 藤原優、横田聖哉、武石朗、飯島功一郎、江川真史 (2020)，RTK-GNSS による地盤変位計測の高速道路法面への適用性に関する検証，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，76(1)，18-31。(Fujiwara, Y., Yokota, S., Takeishi, A., Iijima, K., and Ekawa, M. (2020). "Study on applicability of ground displacement measurements by RTK-GNSS to slope face of expressways." *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers F3 (Civil Engineering Informatics)*, 76(1), 18-31 (in Japanese))
- [11] Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Eng. Geol.* 73, (3-4), 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>.
- [12] Chigira, M., 2009. "September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan." *Engineering Geology*, 108(1-2), 1-15.
- [13] Crosta, G.B. (2004). Introduction to the special issue on rainfall-triggered landslides and debris flows. *Eng. Geol.* 3 (73), 191-192.
- [14] Dong, J.J., Tung, Y.H., Chen, C.C., Liao, J.J., and Pan, Y.W. (2011). Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam. *Engineering Geology*, 117(1-2), 52-61.
- [15] Goodman, R.E. (1989). Introduction to rock mechanics, Wiley.

- [16] Haneberg, W.C. (1991). Observation and analysis of pore pressure fluctuations in a thin colluvium landslide complex near Cincinnati, Ohio. *Eng. Geol.* 31(2), 159-184.
- [17] Hadmoko, D.S., Lavigne, F., Sartohadi, J., and Hadi, P. (2010). Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. *Natural Hazards*, 54(3), 623-642.
- [18] Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., and Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147, 124-136.
- [19] Intrieri, E., Carlà, T., and Gigli, G. (2019). Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review. *Earth-science reviews*, 193, 333-349.
- [20] Intrieri, E., Dotta, G., Raspini, F., Rosi, A., Segoni, S., and Casagli, N. (2021). Early warning systems in Italy: State-of-the-art and future trends. Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Volume 1 Sendai Landslide Partnerships and Kyoto Landslide Commitment 5th, 537-543.
- [21] Jaboyedoff, M., Derron, M.H., Pedrazzini, A., Blikra, L., Crosta, G.B., Froese, C.R., Hermanns, R.H., Oppikofer, T., Bohme, M., and Stead, D. (2012). "Fast assessment of susceptibility of massive rock instabilities." In *Landslides and Engineering Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada (3-8).
- [22] Lyu, H.M., Wu, Y.X., Shen, J., and Zhou, A.N. (2018). Assessment of Social-Economic Risk of Chinese Dual Land Use System Using Fuzzy AHP. *Sustainability*. 10(7), 2451.
- [23] Lyu, H.M., Sun, W.J., Shen, S.L. and Zhou, A.N. (2020). Risk Assessment Using a New Consulting Process in Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*. 146(3), 04019112.
- [24] Reid, M.E. (1994). A pore-pressure diffusion model for estimating landslide-inducing rainfall. *J. Geol.* 102 (6), 709-717.
- [25] Segalini, A., Valletta, A., and Carri, A. (2018). Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: A generalized criterion, *Engineering Geology*, 245, 72-80.
- [26] UNDRO (Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator). (1991). Mitigating natural disasters: Phenomena, effects and options: A manual for policy makers and planners (Vol. 6). *United Nations Publications*.
- [27] Van Westen, C.J., Van Asch, T.W., and Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65(2), 167-184.
- [28] Yeh, P.T., Lee, K.Z.Z., and Chang, K.T. (2020). 3D Effects of permeability and strength anisotropy on the stability of weakly cemented rock slopes subjected to rainfall infiltration. *Engineering Geology*.
- [29] Zezere, J., Trigo, R.M., and Trigo, I.F. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5 (3), 331-344.
- [30] Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P., and Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys. Res. Letters*, 33(7), L07304, doi: 10.1029/2005GL025546
- [31] Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins. (2001). *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer-Verlag, New York
- [32] Prange L, Orliac E, Dach R, Arnold D, Beulter G, Schaer S, Jäggi A. (2017). CODE's five-system orbit and clock solution-the challenges of multi-GNSS data analysis. *J Geod* 91: 345-360, doi: 10.1007/s00190-016-0968-8
- [33] Tseng, T.P., Chen, S.Y., Chen, K.L., Huang, C.Y., and Yeh, W.H. (2018). Determination of near real-time GNSS satellite clocks for the FORMOSAT-7/COSMIC-2 satellite mission. *GPS. Solut.*, 22(2), 22-47, doi: 10.1007/s10291-018-0714-1
- [34] Tseng, T.P., Shum, C.K., Hsiao, Y.S., Kuo, C.Y., and Yeh, W.H. (2021). The impact of semi-annual ionospheric total electron content variation on station displacements derived by single-frequency precise point positioning. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. doi: 10.3319/TAO.2021.0831.01
- [35] Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., and Webb, F. (1997). Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network. *J. Geophys. Res.* 102(B3), 5005-5017, doi: 10.1029/96JB03860
- [36] Hsiao, Y.S., and Tseng, T.P. (2019). A method to pre-process measurements from shipborne gravimetry using IMU/GPS: A case study along western coastal Taiwan, *Journal of the Chinese Institute of Civil & Hydraulic Engineering*, 31(4), 361-368 (EI)

2024 年 05 月 10 日 收稿

2024 年 07 月 17 日 修正

2025 年 01 月 15 日 接受